

## 営業列車による 線路設備モニタリング



松田 博之\*



瀧川 光伸\*



片岡 慶太\*\*



小関 昌信\*

現在、線路設備の検査は、検測専用の車両や保線技術者の目視などにより定期的に行われている。検査の信頼性の向上や効率化を図ることをめざして、営業列車に検測装置を搭載し、軌道の状態を高頻度に監視（モニタリング）する技術開発を進めている。軌道材料および軌道変位の状態をモニタリングする装置として、それぞれ「軌道材料モニタリング装置」および「車体装架型慣性正矢軌道検測装置」を開発し、209系試験電車MUE-Trainに搭載して本線走行試験を行った。並行して、軌道材料モニタリング装置については、距離画像を用いて軌道材料の異常状態を自動判定する機能を開発した。また、車体装架型慣性正矢軌道検測装置については、繰り返し測定時の再現性の精度や現行軌道検測車との整合性の検証により、実用精度に達していることを確認した。

●キーワード：線路設備モニタリング、距離画像、慣性正矢法

### 1. はじめに

鉄道車両を支える線路設備は、列車の繰り返し走行や自然環境に暴露されて、変位・劣化が進行するため、それらの状態を検査により的確に把握し、適切な時期に修繕することが重要である。図1は、当社における一般的な軌道管理方法を示したものである。横軸は時間、縦軸は軌道変位を表している。在来線では、3ヶ月に1回の頻度で、軌道検測車（East-i）によって動的変位（列車荷重作用時の軌道変位）を測定するほか、保線技術者の目や検査機器によって定期的に変位や材料の劣化の状態を点検している。通常は、軌道変位が所定の閾値（修繕の目安値）を超えると、過去の経験やデータを考慮して修繕時期を推定し、計画的に修繕を行っている。しかしながら、検測時に閾値に達していない箇所であっても、道床や路盤の状態などによって軌道変位が急進し、次の検査までもたずにトラブルが発生する場合がある。また逆に、閾値に達しても、その後軌道変位がほとんど進まずに非効率な修繕を招く場合がある。

これに対して、当社では、営業列車に検測装置を搭載し、軌道の状態を高頻度に監視（モニタリング）し、その異常を自動判定することをめざして開発を行っている。これにより、軌道の状態を正確に把握できるため、最適なタイミングでの修繕作業が可能となり、より確実に効率的なメンテナンスの実現が期待できる。また、故障の予兆の早期発見や、故障が発見された場合の運転規制、他の列車への情報配信などの早期対応が可能になる。さらに、目視検査の自動化により、作業負担の軽減を図ることができる。

本稿では、軌道の状態をモニタリングするための装置として開発を進めている「軌道材料モニタリング装置」および「車体装架型慣性正矢軌道検測装置」の概要と、それらを209系試験電車「MUE-Train」に搭載し、走行試験を行った結果について述べる。

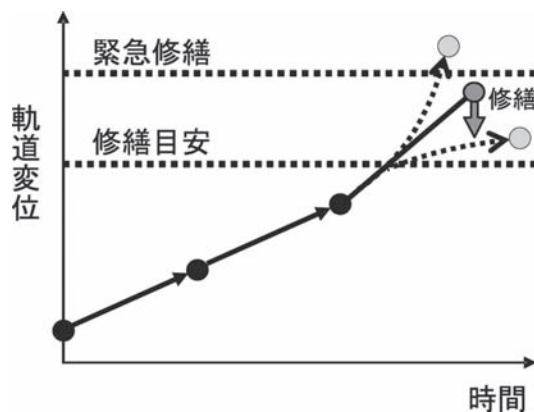


図1 従来の軌道管理方法

### 2. 軌道材料モニタリング装置

軌道材料モニタリング装置は、レール継目板ボルトやレール締結装置などの軌道材料を画像撮影し、その異常状態（図2）を自動判定する装置である。軌道材料をラインセンサカメラなどで撮影する装置については、国内外でもすでに実用化されている。しかし、軌道材料の異常状態を自動判定する機能については、多くの例を見ない。その異常状態を高頻度に自動撮影、自動判定することができれば、線路設備の信頼性が向上するほか、定期検査や徒歩巡視の労力が軽減される。

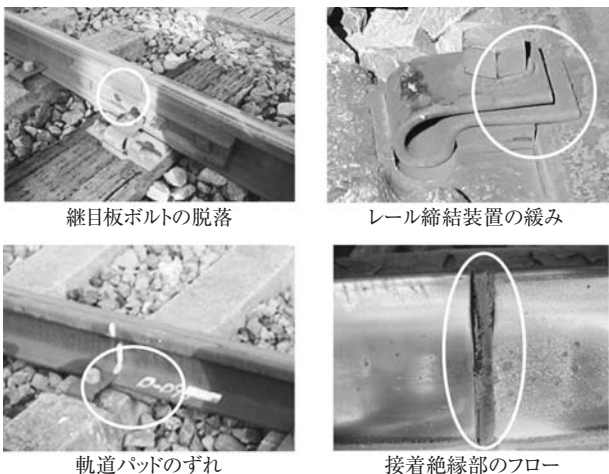


図2 軌道材料の異常状態の例

## 2.1 軌道材料モニタリング装置の構成

現在開発している軌道材料モニタリング装置は、2つの収録装置で構成される。1つは、軌道材料の写真画像（2次元画像）を撮影するための濃淡画像撮影装置（ラインセンサカメラ）である。もう1つは、レール近辺の標高情報（3次元画像）を取得するための距離画像撮影装置（プロファイルカメラ）である。本開発では、主に距離画像を活用して軌道材料の異常状態を自動判定させる予定である。本装置では、レーザスリットプロジェクトとプロファイルカメラを組み合わせ、光切断計測により断面形状を連続的に高速収録することで軌道面の距離画像を得る。距離画像では、各画素の輝度値がカメラからの距離に対応しているため、距離画像から締結装置やボルト部分を特定できれば、その高さ情報が得られ、有無検知や緩み判定が可能となる。

床下ユニットの構成を図3に示す。ここで、本装置は試験用であるためレール片側分のみの構成となっている。寸法は、幅（マクラギ方向） $W=1,020\text{mm}$ 、高さ $H=775\text{mm}$ 、奥行き（レール方向） $B=976\text{mm}$ であり、重量は約 $250\text{kg}$ である。内部には、ラインセンサカメラ、プロファイルカメラ、レーザプロジェクト、LED照明が内蔵されている。また、床下ユニットからのデータは、ケーブルにより車内機器に伝送される構成となっている。

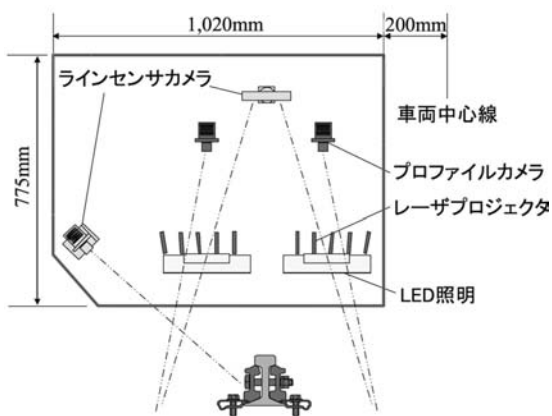


図3 床下ユニットの構成（レール片側分）

## 2.2 MUE-Trainを使った走行試験の概要

軌道材料モニタリング装置の精度確認や、距離画像を用いてボルトの脱落や締結装置の緩みなどを自動判定する機能を開発するために、本装置をMUE-Trainに設置し、2009年1月以降、東北線（宇都宮線）や日光線においてデータ収録試験を行っている。図4は装置の設置状態を示したものである。

MUE-Trainは7両編成であり、本装置は7号車の6号車側の床下に設置されている。また、MUE-Trainへの設置に際しては、飛散物からの保護のため、保護カバーを設置している。



図4 MUE-Trainおよび装置の設置状態

## 2.3 走行試験結果

図5に、レール付近の距離画像の例を示す。図では、白色の箇所ほど標高が高く、黒色の箇所ほど標高が低いことを表している。ただし、レール頭頂面は今回は収録対象外としている。また、破線の断面図を下の画面に表示した。これまでの収録試験の結果より、図のような軌道材料の標高情報の収録が $110\text{km/h}$ までの速度域で可能であることを確認した。

次に、軌道材料の異常状態の自動判定の例を示す。先程の距離画像データを専用のシステム（図6）に入力し、判定処理をかけることによって、異常状態を自動判定する機能を開発した。図7のようなレール締結装置の脱落や軌道パッドのずれなどを、キロ程ごとの検査結果グラフや、経年変化を表すトレンドグラフで表示することが可能である（図8）。また、キロ程を指定することで、指定位置の距離・濃淡画像を表示することも可能である。

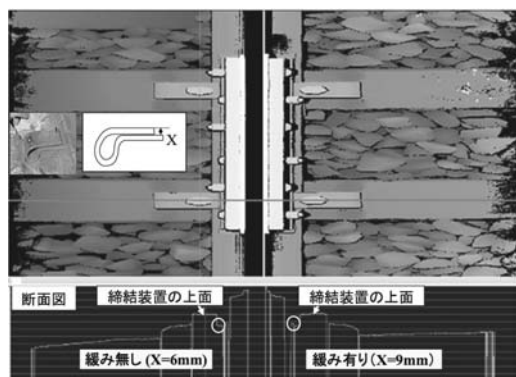
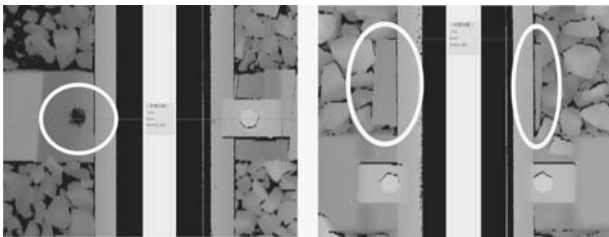


図5 軌道材料の距離画像

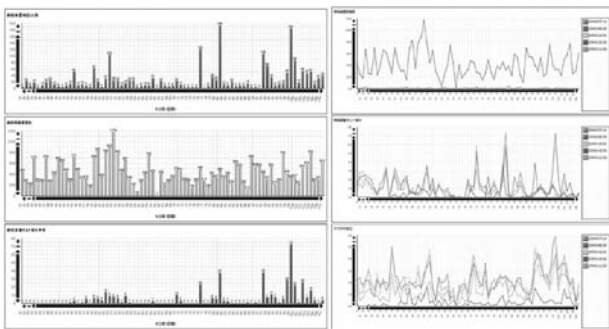


図6 検査システム



縮結装置の脱落 軌道パッドのずれ

図7 距離画像の例



結果表示グラフ トレンドグラフ

図8 判定結果のグラフ表示の例

### 3. 車体装架型慣性正矢軌道検測装置

車体装架型慣性正矢軌道検測装置は、軌道変位（高低、軌間、水準、平面性）を営業列車から高頻度に測定し、変位進みを正確に把握することをめざして開発している装置である。従来の軌道検測車は、各台車の近傍に専用の検出装置が設置されているため、全体的に大きな装置となっている。そのため、軌道検測車に搭載されている装置をそのまま営業列車に設置するのは難しい。営業列車に設置するためには検測装置を小型化する必要がある、これを実現できる手法として慣性正矢法による軌道検測装置（（財）鉄道総合技術研究所による開発）を選定した。

#### 3.1 慣性正矢軌道検測装置の概要

慣性正矢軌道検測装置では、車体で加速度を測定し、それを積分することにより装置自体の変位を算出する（慣性法）とともに、装置とレールとの相対変位をレーザーにより測

定する（2軸レール変位検出装置）。この両者の差を計算することにより、軌道変位が求められる。

この装置は、1点の測定だけで軌道変位が得られるため、従来の軌道検測車のように車両1両分を占めていた装置に比べ、小型化・低価格化が可能となる。

また、従来の軌道検測車は、車両工場での検査時に、軸箱と一体で取り付けられている関係部品を取り外し、検査終了後に再設置する作業が行われているが、慣性正矢軌道検測装置は外付け装置のため、こうした解体・組立作業が不要となる。

#### 3.2 車体装架型慣性正矢軌道検測装置の開発

慣性正矢軌道検測装置は、すでに九州新幹線において台車装架型（車両の台車枠に設置）の装置が実稼働されている。しかしながら、台車装架型装置は寸法上の制約があるため、取り付けが困難な台車もある。そこで、車両への取付箇所の制約が少ない、車体装架型（車体の床下に設置）の装置を新たに開発することとした。

車体装架型の場合、設置位置からレールまでの距離が離れているため、測定可能な範囲を広くとる必要があり、結果として測定対象外の物体をとらえてしまうおそれがある。このため、測定対象物を正しく判断し、迅速に処理するための改良が重要な課題となった。

現在開発している車体装架型装置は、検測ユニット（床下）、制御ユニット、データ処理・収録用パソコン、電源（以上、床上）で構成されている。検測ユニットの具体的な構成図を図9に示す。寸法は、幅（マクラギ方向） $W=1,440\text{mm}$ 、高さ $H=445\text{mm}$ 、奥行き（レール方向） $B=320\text{mm}$ であり、重量は約 $170\text{kg}$ である。内部には、加速度計、光ファイバージャイロ、2軸レール変位検出装置、および演算回路が内蔵されている。また、検測ユニットからのデータは、光ファイバケーブルにより床上の制御ユニットに伝送される構成となっている。

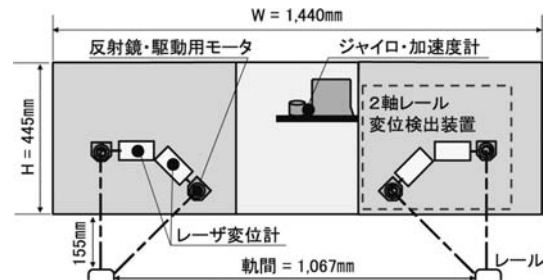


図9 検測ユニットの構成

#### 3.3 MUE-Train を使った走行試験の概要

車体装架型装置の検測精度の検証のため、装置をMUE-Trainに設置し、2009年1月以降、首都圏の主要線区において試験検測を実施している。図10は装置の設置状

態を示したものである。本装置は、MUE-Train7号車の6号車側の台車近傍に設置されている。



図10 車体装架型装置の設置状態

### 3.4 繰り返し測定時の再現性の精度

同じ区間の繰り返し検出時の精度を検証した。図11は高低変位、図12は通り変位を、3日間に9回、同じ区間で測定した波形である。図中の $\sigma$ は、最上段の波形を基準とした場合の、各波形の再現性誤差の標準偏差である。なお、繰り返し測定時の再現性誤差の標準偏差は、在来線では0.5mm以内を目標としている。

10m弦高低変位は、図11に示すように再現性誤差はすべて0.3mm以下となっており、実用上十分な検出精度が得られている。また、その精度には速度依存性は見られない。次に、10m弦通り変位についても、図12に示すように再現性誤差は最大で0.41mmとなり、実用上十分な精度を達成している。なお、10m弦高低と同様、その精度に速度依存性は見られない。

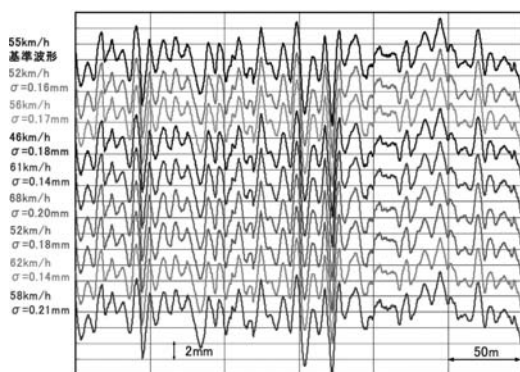


図11 10m弦高低検出波形の繰り返し再現性

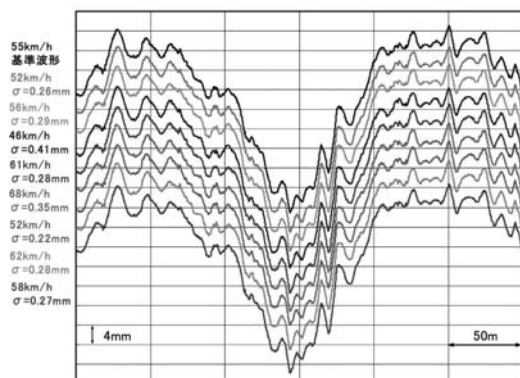


図12 10m弦通り検出波形の繰り返し再現性

### 3.5 現行検出車との整合性の検証

次に、現行検出車による測定結果と本装置による測定結果とを比較し、その整合性を検証した。図13は、それぞれの測定結果について、上段に10m弦高低変位の波形、下段に10m弦通り変位の波形を示したものである。本装置の測定波形は、軌道検出車の測定から3日後に測定されており、両者の測定速度は約60km/hでほぼ同一である。

図13より、10m弦高低では、本装置と軌道検出車の波形は精度良く一致している。一方10m弦通りでは、レール側面位置の検出方法の違いにより、細部の違いは見られるものの、両者の波形は形状、振幅ともに概ね一致している。

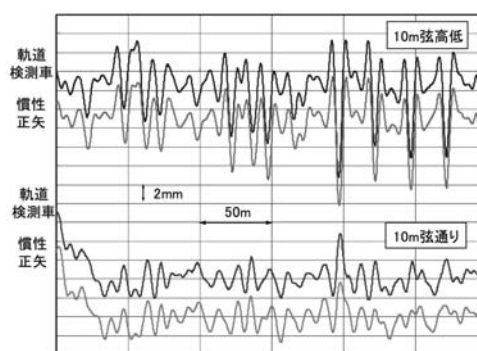


図13 軌道検出車と慣性正矢の比較

## 4. おわりに

軌道材料モニタリング装置については、距離画像を用いて軌道材料の異常状態を自動判定する機能を開発した。また、車体装架型慣性正矢軌道検出装置については、繰り返し測定時の再現性の精度や現行軌道検出車との整合性の検証により、実用精度に達していることを確認した。

今後も走行試験を継続し、装置の信頼性や耐久性の確認などを行うとともに、営業列車への搭載に向けて、特に車上装置の小型化やデータの無線伝送、遠隔操作技術の開発を進めていく予定である。

なお本開発では、(財)鉄道総合技術研究所軌道管理研究室や関係メーカーの皆さまに多大なるご協力を頂いた。この場を借りて厚く御礼申し上げる。

### 参考文献

- 1) 竹下、矢澤：慣性正矢法による軌道狂い検出装置の開発、鉄道総研報告、Vol.14、No4、2000.4
- 2) 森高、松本、矢澤：九州新幹線車両による総合軌道検出実現に向けた技術開発、日本鉄道施設協会誌、2009.11